灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系

王思远 [1,2], 吴文传 [1,2]

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 100084；
2. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室，清华大学，北京市 100084)

摘要：高比例新能源发电给电网带来了显著的波动性和不确定性。为了解决这一问题，需要利用大量的灵活性资源参与电网调度并提供辅助服务。灵活性资源的数量众多、分布广泛且特性各异，给资源的集群化管理带来了一定困难，需要对集群的功率可调节范围进行量化评估。本文基于灵活性资源集群在电网调度和电力市场中的应用需求，提出了评估灵活性的量化指标体系。根据集群中灵活性资源的物理特性，将其分类为发电机类和储能类，并分别聚合为等效发电机设备和等效储能设备作为聚合参考模型。这两个等效设备的参数被用作量化指标体系，具有直观的物理意义、良好的多重嵌套特性，并适用于多种时间尺度。该指标体系可以被广泛应用于分布式资源集群的异步调度、综合能源系统的联合优化调度以及虚拟电厂参与电力市场的投标报价等多个场景中。

关键词：灵活性资源；聚合参考模型；量化指标体系；高维多面体投影

0 引言

随着我国“西电东送”战略的实施和碳中和目标的提出，东部电网的区外来电和新能源发电比例均迅速提升。受端电网面临空心化问题，一次调频能力显著不足，并且波动性大幅增加。因此，需要充分利用本地的灵活性资源参与电网的调控能力，为电网提供多种类型的辅助服务产品，从而确保电网的安全平稳运行。

灵活性资源包括分布式电源、分布式储能和可控负荷等多种分散分布在配电网中的资源。随着智能电网建设的推进，配套的通信和控制技术迅速发展，为优化调控大规模灵活性资源提供了良好基础。灵活性资源广泛分布，规模较小，具备快速响应能力，可在用电高峰时调整电力消耗或向电网供电，从而降低电网峰值负荷，减少电网和电源的冗余投资。此外，大规模灵活性资源还可以为电网提供调压、调频、调峰和备用等多种辅助服务。

然而，由于灵活性资源数量众多且分布广泛，且各种类型的资源具有不同特性，需要按照变电站供电范围自然划定的区域以集群的形式进行管理。为了更加准确地表征集群的灵活性，需要构建一套量化指标体系对集群整体的灵活性进行量化评估，从而实现对灵活性资源的聚合[1,2]。

现有的部分工作定义了灵活性资源的特征指标，并研究了集群的聚合评估方法。文献[3]解释了“灵活性”的概念，提出了一种用于对灵活性资源的特征进行分类的方法，将特征分为定量指标、定性指标、可控性指标和成本指标几类；文献[4,5]用广义的虚拟储能设备的形式表征集群的灵活性；文献[6,7]提出了温控负荷的灵活性聚合方法，以利用其储能特性。部分工作将灵活性供应和需求的概率性作为评估指标，从而实现对系统响应能力的评估。文献[8]和[9]分别将灵活性的指标定义为爬坡能力不足的预期和概率；文献[10]中将灵活性表示为在特定时间段内灵活性供应相对于需求充足的概率。此外，还部分工作采用几何方法来描述资源的灵活性。文献[11]提出了灵活性包络的概念，用于表示特点时间尺度的电力系统运行规划；文献[12]中引入了可调度域的概念，用多面体表示风电设备的灵活性范围；文献[13]构建了 zonotope 多面体的灵活性聚合结果；文献[14]基于 Minkowski Sum 算子，将大量热泵聚合为虚拟储能或虚拟同步机的形式。文献[15]首先构建了统一形式的灵活性资源模型，标准化处理各类模型的灵活性区域的几何形状后再利用 Minkowski Sum 算子进行聚合；文献[16]提出了计算多面体形式的聚合灵活性空间的顶点搜索方法。文献[17]将灵活性资源集群聚合为一种特殊发电机的形式。为了考虑灵活性资源的随机性因素，文献[18]中基于机会约束方法计算出了虚拟电厂的概率性可调节范围；文献[19]将各个区域电网

进行聚合出力，计算了区域电网联络线的灵活范围；文献[20]计算了灵活性资源集群各时刻的功率上下限可调范围；文献[21]提出了分别包含容量、爬坡、时间和成本等多个因素的节点运行包络模型。为了保证基于聚合结果进行优化后的控制策略具有可行性，文献[22]和[23]分别针对灵活性可行域的范围用高维立方体和高维椭球体进行内接近似；文献[24]构建了灵活性资源统一的储能形式数学模型，并计算了高精度的集群灵活性外接模型。

现有的工作往往针对不同的应用需求而采用不同的灵活性指标，缺乏一种系统性的、能够考虑大规模灵活性资源可调节范围的系统建模方法和通用的量化指标体系。因此，需要一组物理意义更加明确的聚合参考模型，形成更加直观且适用于多种应用场景的指标体系。

本文从灵活性资源集群参与调度和辅助服务市场的需求出发，整理了灵活性量化指标体系，并归结为类发电机特性、类储能特性和共有特性三种类型。随后，构建了由等效发电机和等效储能设备组成的灵活性资源聚合参考模型，并提供了多类型灵活性资源聚合方法与指标体系的求解方法。所提出的聚合参考模型具有直观的物理意义和多重嵌套特性，可适用于多种时间尺度，为电网的调控和辅助服务应用提供基础。提出的指标体系计算方法保证了解聚合的可行性，并且获得了尽可能大的灵活性资源功率可调节范围，使得多种类型资源聚合后的灵活性得到准确评估和充分利用。

本文的组织结构如下：第 1 节介绍了评估灵活性的量化指标体系；第 2 节给出了灵活性资源聚合的数学模型。该模型基于灵活性资源的物理特性构建了以等效发电机和等效储能设备为主的灵活性资源聚合参考模型，并提供了指标体系参数求解方法；第 3 节介绍了灵活性资源聚合模型在以下三个方面的应用：分布式资源集群的异步调度、综合能源系统的联合优化调度，以及作为虚拟电厂参与电力市场投标报价；最后，在第 4 节中进行了总结。

1 评估灵活性的量化指标体系

量化灵活性资源集群的整体特征是评估其可调节能力的重要前提。在国内外典型的辅助服务市场中[25,26]，针对提供辅助服务的市场主体均提出了性能指标。因此为了构建适当的量化特征指标体系，需要根据不同的灵活性应用场景下的性能需求选择合适的指标。

1）调峰与备用。在灵活性资源参与电网调峰或备用辅助服务时，调度中心需要确认参与调度设备的功率可调节范围，基于其功率容量、爬坡速率和能量容量进行调度决策。其中，功率容量反映了灵活性资源可调节功率的上下限。爬坡速率则反映了灵活性资源的调节速度。在美国 PJM 辅助服务市场，备用辅助服务的性能通过规定时间内的备用响应水平来衡量[27]。能量是功率对时间的积分，能量容量反映了灵活性资源在一定时间内净输出/输入能量的调节能力。对于储能类型的设备，其储能容量有一定限制；对于发电机类型的设备而言，其在能量容量上面无约束。

2）调频。在国家能源局华北监管局印发的《华北区域并网发电厂"两个细则"（2019 年修订版）》文件中[28]，以 15 秒、30 秒出力响应指数和电量贡献指数三个指标来考核机组的一次调频性能。美国 PJM 辅助服务市场用调频响应时延、调频曲线相关性和调频精度三个指标衡量调频辅助服务的性能[29]。在上述辅助服务市场的性能指标中，为了保证调频和备用的响应速度和对于指令信号的跟随精度，市场对参与主体的响应时间和爬坡能力提出了要求。另外，灵活性资源的下垂系数、惯量和响应时间也是衡量一次调频性能的重要动态指标。

3）调压。灵活性资源的动态调压性能可以通过无功可调节容量、下垂系数和响应时间进行衡量。

4）调控成本。根据灵活性资源的不同类型，调控成本可分为调节成本、燃料成本、弃电成本和维护成本几种类型。其中，调节成本主要存在于可控负荷和储能设备等资源类型；燃料成本则主要指小容量发电机在发电过程中消耗的燃料费用；弃电成本则是由光伏和风机等新能源设备未能全力发挥而造成的损失；维护成本包括灵活性资源设备的维修保养费用以及储能电池模块的更换成本等。

部分灵活性资源受到天气和社会系统的影响，导致其灵活性参数具有一定的随机性，可以采用区间理论或概率分布函数进行求解计算。在文献[30,31]中，提出了相对距离测度区间理论，实现了在考虑不确定性条件下进行区间网络优化。此外，文献[32]采用混合高斯模型拟合随机变量的联合概率分布函数，并用机会约束方法将含有随机变量的约束条件转化为一定置信度下的确定性约束条件，从而在给定置信度下实现了灵活性评估。

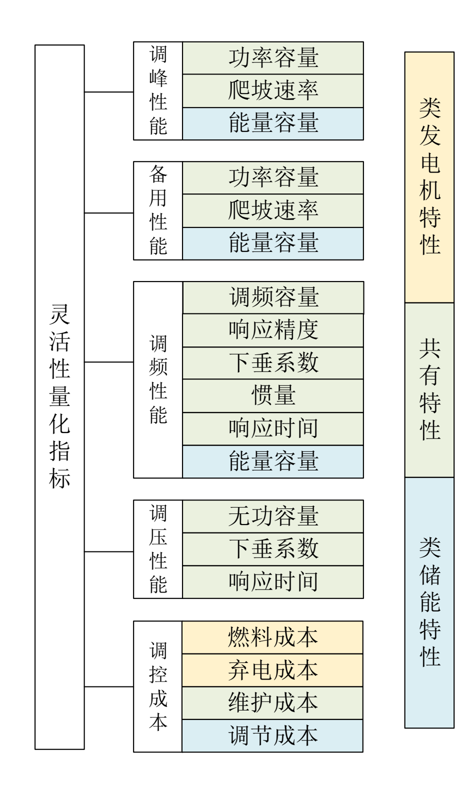


图 1　灵活性量化指标

Fig. 1　Quantitative metrics of flexibility

为了使分布式资源具备参与电网调度和电力市场的资格，需要将小容量的灵活性资源聚合成一个集群。如图 1 所示，根据灵活性资源集群在参与电网调度和辅助服务市场中的应用需求，可将各类型场景下的性能指标归结为三类：类发电机特性、类储能特性和共有特性。其中，灵活性资源的动态特性等效聚合方法在文献[33]和[34]中进行了介绍，下文将主要从稳态功率可调范围的角度，介绍如何根据资源特性将集群等效聚合成由等效发电机和等效储能设备所组成参考的模型。

2　灵活性资源聚合参考模型的构建与量化指标的计算

2.1　灵活性资源聚合的数学模型

所谓灵活性资源聚合，就是在考虑资源集群网络约束和设备约束的前提下，将集群内的各设备各时刻的功率可调节范围映射至集群与上级电网的并网点处，从而用并网点处各时刻的功率可调节范围来代表集群中所有灵活性资源设备的功率可调节范围。

在灵活性资源聚合问题中，决策变量 $\boldsymbol{x}$ 表示由集群内各个灵活性资源设备在各时刻的有功和无功功率所构成的向量。在约束条件方面，灵活性资源的聚合问题需要考虑网络约束条件和每个灵活性资源的设备约束条件，例如发电机的功率约束条件和爬坡约束条件、储能设备的功率约束条件和能量约束条件、暖通空调设备的温度舒适约束等。其中，网络约束条件描述的是单个时间断面下各个灵活性资源设备之间的约束条件，具有空间耦合特性；设备约束条件描述的是单个设备在各个时间点之间的约束条件，具有时间耦合特性。决策变量之间的空间耦合条件与时间耦合条件相互交织。

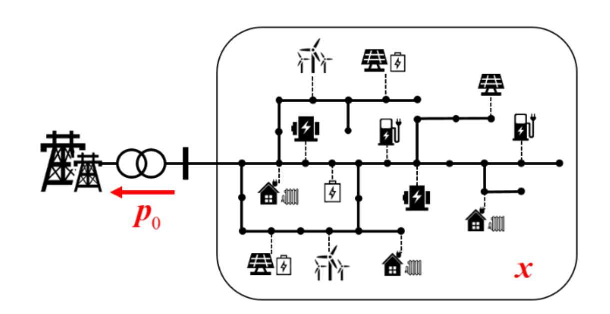


图 2　灵活性资源聚合示意图

Fig. 2　Schematic of aggregated flexible energy resources

为了简化表述，采用线性潮流模型，决策变量的线性技术约束条件可以记作如下紧凑的矩阵约束形式：

$$\boldsymbol{Ex} \le \boldsymbol{f} \tag{1}$$

基于线性潮流模型，各时刻并网点处的有功功率 $\boldsymbol{p}_0$ 也可以由决策变量向量 $\boldsymbol{x}$ 用线性运算方式表示，记作：

$$\boldsymbol{p}_0 = \boldsymbol{Cx} + \boldsymbol{d} \tag{2}$$

结合式(1)和式(2)的约束条件，可以得到一个高维多面体形式的灵活性资源集群的有功功率可调节范围，此高维多面体 $\mathcal{P}_1$ 所在的空间 $\mathbb{F}_1$ 由向量 $\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{p}_0$ 共同张成，表示为：

$$\mathcal{P}_1 = \left\{ \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{p}_0 \end{bmatrix} \middle| \begin{matrix} \boldsymbol{Ex} \le \boldsymbol{f}, \\ \boldsymbol{p}_0 = \boldsymbol{Cx} + \boldsymbol{d} \end{matrix} \right\}, \mathcal{P}_1 \subset \mathbb{F}_1 \tag{3}$$

灵活性资源集群聚合后的可调节范围 $\mathcal{P}_2$ 可以用并网点处各时刻的功率约束条件表示，其所在空间 $\mathbb{F}_2$ 由向量 $\boldsymbol{p}_0$ 张成，表示为：

$$\mathcal{P}_2 = \left\{ \boldsymbol{p}_0 \middle| \boldsymbol{Ap}_0 \le \boldsymbol{b} \right\}, \mathcal{P}_2 \subset \mathbb{F}_2 \tag{4}$$

从数学意义来看，由 $\mathcal{P}_1$ 计算 $\mathcal{P}_2$ 的过程可以视为高维空间 $\mathbb{F}_1$ 中的 $\mathcal{P}_1$ 向稍低维的空间 $\mathbb{F}_2$ 进行降维投影得到 $\mathcal{P}_2$ 的过程。通过投影运算，决策变量 $\boldsymbol{x}$ 所在的维度被消去，而并网点处的有功功率 $\boldsymbol{p}_0$ 所在的维度被保留。高维多面体 $\mathcal{P}_2$ 中的参数 $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{b}$ 是根据投影运算计算得到的。但是，从纯数学问题的角度而言，计算高维多面体向低维空间投影的影多面体参数是一个 NP 难题。而在本问题中 $\mathcal{P}_1$ 的维数可能高达上千维，因此几乎不可能得到投影后多面体 $\mathcal{P}_2$ 中的参数 $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{b}$ 的精确解。因此，在实际应用中，需要结合物理意义选取适当的参数来构造一个多面体 $\hat{\mathcal{P}}_2$，用于近似真实的投影多面体 $\mathcal{P}_2$。其中，用于表述 $\hat{\mathcal{P}}_2$

的参数，即可作为聚合参考模型的指标体系。

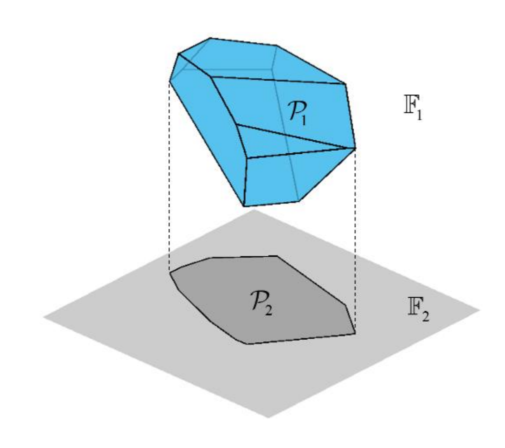


图 3　高维多面体投影示意图

Fig. 3　Schematic of high-dimensional polytope projection

为了保证灵活性资源集群解聚合的可行性，还应该确保 $\hat{\mathcal{P}}_2 \subseteq \mathcal{P}_2$，即近似的多面体 $\hat{\mathcal{P}}_2$ 应该包含于原始的多面体 $\mathcal{P}_2$。这是因为，对于一个并网点处的有功功率调度指令 $\boldsymbol{p}_0^*$，只有满足 $\boldsymbol{p}_0^* \in \mathcal{P}_2$ 时，才能在 $\mathcal{P}_1$ 中找到与之对应的决策变量 $\boldsymbol{x}$ 的解，从而实现对调度指令的解聚合。另外，为了减小近似误差，$\hat{\mathcal{P}}_2$ 的体积应该尽可能地大，因此在最理想的情况下，$\hat{\mathcal{P}}_2$ 内接于 $\mathcal{P}_2$。

2.2 灵活性资源聚合的物理意义

由于灵活性资源的聚合是将多个设备的功率调节范围的特性聚合为一个实体的调节特性。因此，对于多个具有爬坡约束条件的灵活性资源，聚合后仍然体现为具有爬坡约束的性质；对于多个具有能量约束条件的灵活性资源，聚合后仍然体现为具有能量约束的性质。因此，根据灵活性资源的上述特性，可以将种类繁多的灵活性资源按照性质进行分类聚合。对于输出功率的调节速率有限制的灵活性资源设备，可以将其分类为发电机类，其特性体现为功率对时间的微分有上下限约束；对于输入输出的能量有限制的灵活性资源设备，可以将其分类为储能类，其特性体现为功率对时间的积分有上下限约束。常见的灵活性资源设备分类如下表所示：

表 1　灵活性资源的分类

Table 1　Classification of flexible energy resources

发电机类	储能类
微型发电机	储能系统
燃料电池	电动汽车
光伏设备	暖通空调
风力发电机	气网
可削减负荷	热网
不可调负荷	可转移负荷

其中，对于不存在爬坡约束而仅有功率约束的灵活性资源设备，也可以将其归为发电机类，只需要将其爬坡约束参数视为很大的一个值即可。

2.3 计算灵活性资源聚合的量化指标

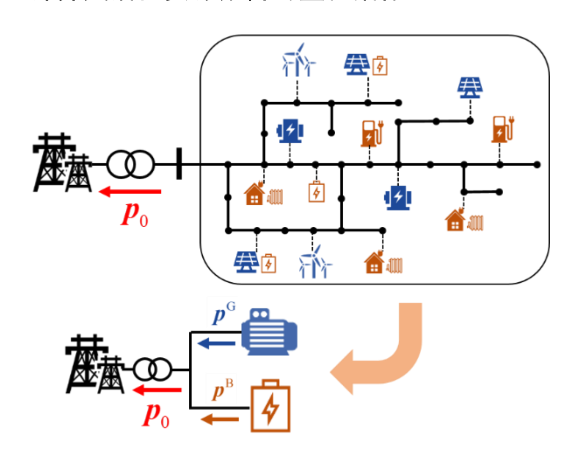


图 4　灵活性资源聚合为等效发电机和等效储能示意图

Fig. 4　Schematic of aggregated flexible energy resources into an equivalent generator and an equivalent energy storage device

基于物理意义，在计算灵活性资源聚合模型时，可以先将集群中的灵活性资源进行分类，并分别聚合为等效发电机和等效储能两个设备。两个设备的功率可调节范围分别表示如下：

$$\hat{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{G}} = \left\{ \boldsymbol{p}^{\mathrm{G}} \middle| \begin{array}{l} \underline{r}_t^{\mathrm{G}} \le p_t^{\mathrm{G}} - p_{t-1}^{\mathrm{G}} \le \overline{r}_t^{\mathrm{G}}, \\ \underline{p}_t^{\mathrm{G}} \le p_t^{\mathrm{G}} \le \overline{p}_t^{\mathrm{G}}, \forall t \in \mathcal{T} \end{array} \right\} \tag{5}$$

$$\hat{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{B}} = \left\{ \boldsymbol{p}^{\mathrm{B}} \middle| \begin{array}{l} \underline{e}_t^{\mathrm{B}} \le \sum_{\tau=0}^{t} p_t^{\mathrm{B}} \Delta t \le \overline{e}_t^{\mathrm{B}}, \\ \underline{p}_t^{\mathrm{B}} \le p_t^{\mathrm{B}} \le \overline{p}_t^{\mathrm{B}}, \forall t \in \mathcal{T} \end{array} \right\} \tag{6}$$

其中，$\mathcal{T}$ 表示由全体时间点构成的集合；等效发电机设备的功率可调节范围用各时刻功率上下界 $\overline{p}_t^{\mathrm{G}}$ 和 $\underline{p}_t^{\mathrm{G}}$、各时刻爬坡约束上下界 $\overline{r}_t^{\mathrm{G}}$ 和 $\underline{r}_t^{\mathrm{G}}$ 表示；等效储能设备的功率可调节范围用各时刻功率上下界 $\overline{p}_t^{\mathrm{B}}$ 和 $\underline{p}_t^{\mathrm{B}}$、各时刻能量约束上下界 $\overline{e}_t^{\mathrm{B}}$ 和 $\underline{e}_t^{\mathrm{B}}$ 表示。

在整合等效发电机和等效储能后，灵活性资源集群的聚合模型 $\hat{\mathcal{P}}_2$ 最终表示如下：

$$\hat{\mathcal{P}}_2 = \left\{ \boldsymbol{p}_0 \middle| \begin{array}{l} \boldsymbol{p}_0 = \boldsymbol{p}^{\mathrm{G}} + \boldsymbol{p}^{\mathrm{B}}, \\ \boldsymbol{p}^{\mathrm{G}} \in \hat{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{G}}, \boldsymbol{p}^{\mathrm{B}} \in \hat{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{B}} \end{array} \right\} \tag{7}$$

灵活性资源集群中的设备可以被分为发电机类和储能类两类设备，并分别聚合为等效发电机和等效储能。然而由于两种类型设备之间通过网络约束条件相互耦合，导致一类设备的状态发生变化时，另一类设备的可调节范围会发生变化，影响了两个等效模型的计算结果。因此，需要利用鲁棒优化方法，将两种类型设备间网络耦合约束条件进行拆分。随后，可以分别计算出等效发电机和等效储能两个等效设备的参数。下面以等效发电机设备为例，介

绍计算参数的过程。

基于灵活性资源聚合的数学含义可知，灵活性资源集群中的发电机设备聚合为等效发电机的过程，可视为所有发电机类设备的功率的可调节范围 $\mathcal{P}_1^{\mathrm{G}}$ 向并网点处等效发电机设备有功功率 $\boldsymbol{p}^{\mathrm{G}}$ 可调节范围 $\mathcal{P}_2^{\mathrm{G}}$ 的投影。由于无法计算 $\mathcal{P}_2^{\mathrm{G}}$ 的精确结果，需要对其进行近似。为了保证灵活性资源集群解聚合的可行性，需要计算其内接的多面体 $\hat{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{G}}$ 的参数。现有的计算方法主要包括傅里叶消去法[35]、顶点搜索法[36]、内接高维立方体[37]和内接高维高维椭球[23]等。本文简要介绍高维多面体投影及边界收缩算法[38]的计算原理，其主要流程如下：

首先，基于物理意义，发电机类设备的聚合结果仍然具有发电机的性质，据此可以给定式(5)所示的等效发电机的数学形式，相当于给定了内接的多面体的形状模板。计算过程的示意图如图 5 所示。由于投影多面体 $\mathcal{P}_2^{\mathrm{G}}$ 的外接多面体参数可以非常方便地通过直接求解优化问题找到对应的极点快速得到，因此可以先计算出投影多面体 $\mathcal{P}_2^{\mathrm{G}}$ 的外接多面体，记作 $\bar{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{G}}$ 。

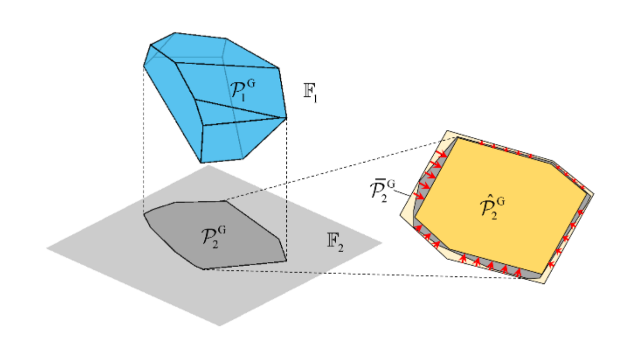


图 5　计算等效发电机设备参数示意图

Fig. 5　Schematic of calculating the parameters of the equivalent generator

随后，基于高维多面体投影及边界收缩算法，在保持外接多面体各个面斜率不变的情况下，各个面向内部进行收缩，直至所有顶点完全收缩至投影多面体 $\mathcal{P}_2^{\mathrm{G}}$ 的内部或边界上，成为 $\mathcal{P}_2^{\mathrm{G}}$ 的内接多面体，记作 $\hat{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{G}}$ 。这一收缩过程对应于等效发电机设备 4 组参数 $\overline{p}_t^{\mathrm{G}}$ ，$\underline{p}_t^{\mathrm{G}}$ ，$\overline{r}_t^{\mathrm{G}}$ 和 $\underline{r}_t^{\mathrm{G}}$ 的变化。在收缩完成后，$\hat{\mathcal{P}}_2^{\mathrm{G}}$ 所对应的参数即等效发电机设备所对应的参数。

与上述过程类似，可以选取式(6)所示的储能模板，利用高维多面体投影及边界收缩算法，计算出等效储能设备的 4 组参数 $\overline{p}_t^{\mathrm{B}}$ ，$\underline{p}_t^{\mathrm{B}}$ ，$\overline{e}_t^{\mathrm{B}}$ 和 $\underline{e}_t^{\mathrm{B}}$ 。相关的技术细节可以参阅文献[38]。

另外，值得注意的是，在综合能源系统中，气网与热网具有良好的储能禀赋，从电网的视角来看，气网与热网均可被视为等效储能设备，从而通过气电转换设备（例如：燃气轮机、电转气设备）或热电转换设备（例如：电热锅炉、热电联产机组）为电网提供调峰的灵活性。气网与热网的等效储能参数指标也可以通过类似方法计算获得。

上述提出的聚合参考模型与指标体系具有以下几个优点：

1）具有直观的物理意义。等效发电机设备可用于代表响应速率有一定约束，但是对于长期响应的持久性无要求的设备；等效储能可用于代表响应速率无约束，但是对于响应的累计能量有约束的设备。这使得数量众多、特性各异的灵活性资源集群具有了十分直观的指标体系参数，可为上级电网所需要的不同的辅助服务需求提供了有效参考；

2）具有良好的多重嵌套特性。基于上述聚合参考模型所得到的等效发电机和等效储能设备，仍然可以用同样的方法进一步参与更高一级的电网聚合，这使得电网可以下而上逐级进行聚合，从而简化更高一层级的电网调度；

3）适用于多种时间尺度。聚合参考模型中的时间颗粒度可以根据调度需求进行自主选择，因此无论是分钟级的调度，还是秒级的控制，都能够作为可调控范围的指标进行应用。这使得聚合参考模型能够适应多种时间尺度的调控需求。

3　灵活性资源聚合模型的应用

3.1　分布式资源集群的异步调度

利用灵活性资源聚合参考模型，可以通过分层级的形式实现海量分布式资源的异步调度。传统针对灵活性资源的调度架构通常包括集中式或者分布式进行。在集中式的调度架构中，需要将所有设备各时刻的功率均作为控制变量，并由调控中心进行统一优化调度。这将导致优化问题的规模过于庞大，求解时间过长，因此难以进行海量分布式灵活性资源的统一调度。另外，现有的分布式计算方法是将优化调度问题拆分为一个主问题和多个子问题的形式，通过反复的同步迭代，交换各优化问题之间的边界变量，最终收敛至最优值。但是，分布式的方法存在收敛速度慢，甚至可能完全不收敛的问题，而且算法迭代的过程中要求所有问题以同步的方式进行，对通信故障的容忍度较低，这给分布式方法的实际应用带来了较大的困难。

基于分布式资源集群的聚合模型，可以进行分布式资源集群的异步调度。首先，大量的分布式资源按照地理位置关系被编入各个集群。各个集群的聚合商计算出各集群的聚合模型，并上传至上级电网的调控中心。由于计算集群自身聚合模型时无需与其他集群中的设备进行交互，因此调控中心对于

集群上传聚合模型没有同步性的要求，这一过程可以被异步完成。随后，在上级电网收集完成所有集群的聚合模型后，基于聚合模型进行优化调度，并向各个集群下发调度命令。最后，集群的聚合商在收到上级电网的调度命令后，将调度指令进行解聚合，通过求解集群内部的优化调度问题将调度指令分解给各个分布式资源，形成各个分布式资源的调度计划。

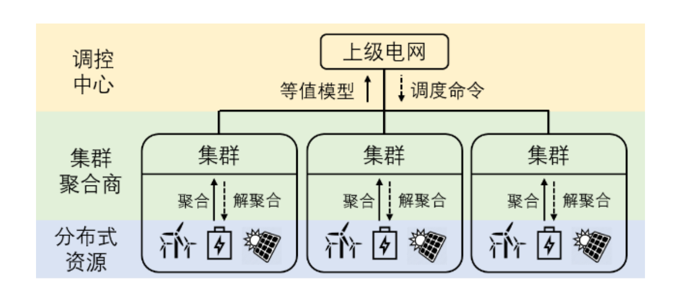


图 6　基于等值模型的分布式资源异步调度示意图

Fig. 6　Schematic of equivalent model based asynchronous dispatch

这一分层分级的调度模式有效解决了分布式资源设备数量庞大导致的计算复杂度过高的难题，另外，对于集群内部各个灵活性资源设备的详细数据信息起到了一定程度的隐私保护作用。

3.2 综合能源系统的联合优化调度

在综合能源系统中，气网与电网通过燃气轮机、电转气设备实现天然气与电能的相互转化。从电网的视角来看，气电两种能量形式的转化过程可以分别类比于储能设备的放电过程和充电过程[39]。与此相类似，热网与电网之间通过电热锅炉、热电联产机组等设备实现电能向热能的转化以及电热源之间的耦合。由于热负荷中具有一定的热惯性，因此对于电网而言，热网可以同样承担储能的角色。

基于气网和热网的储能特性，可以将其投影到电功率的灵活性空间中，视为电力系统中的等效储能设备。等效储能的指标参数可以基于相同的原理，利用上述高维多面体投影及边界收缩算法进行计算。以气网为例，将气网转化为等效储能设备的示意图如图 7 所示。气网的状态方程可以近似为线性[40]，气网中的气源压力、压缩机增压、燃气轮机和电转气设备的气流量可以被视为气网中的决策变量 $\boldsymbol{x}$，各设备的技术约束条件和各气网节点的气压约束条件构成了气网的全部技术约束条件，可以整理为如式(1)所示的线性形式。气网向电网净输出的功率可以视为气网等效储能的净输出功率，并通过线性变换整理为式(2)进行表示。

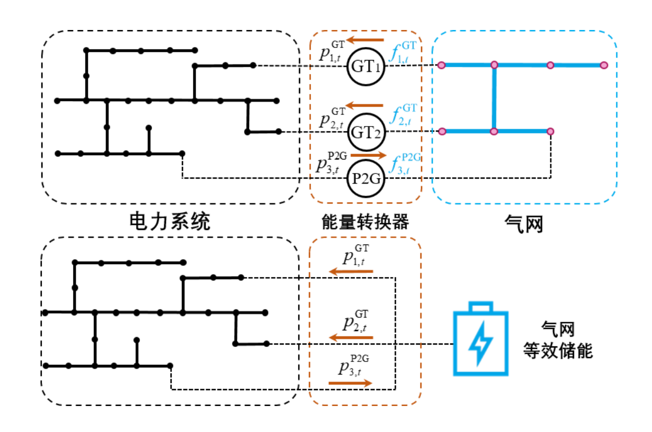


图 7　将气网转化为等效储能设备的示意图

Fig. 7　Schematic depicting the conversion of the gas network into an equivalent energy storage device.

值得注意的是，由于气网/热网与电网之间是通过多个能量转换器设备进行互联的。因此除了计算等效储能设备的能量参数之外，还需要计算各个能量转换器之间的耦合约束条件。这些耦合约束条件由气网的网络约束条件隐式决定，形成了一个复杂的高维空间约束条件。为了能够得到一个显式的约束表达形式，可以使用一个内接的高维单象限椭球模型来简化各转换器设备之间的耦合约束关系[41]，例如，图 7 中 3 个能量转换器之间的约束关系可以表示为如图 8 所示的可调范围。椭球参数的计算方法可以参见文献[41]。

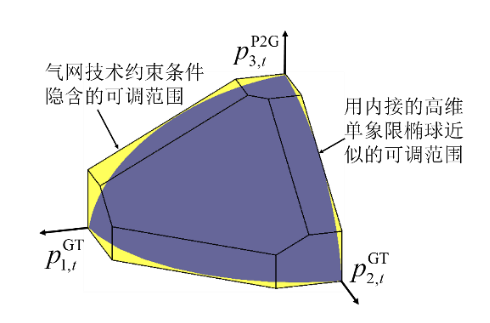


图 8　用内接的高维单象限椭球描述的能量转换器之间耦合关系的示意图

Fig. 8　Schematic depicting coupling relationship among energy converters with inscribed high-dimensional quadrant ellipsoids.

3.3 虚拟电厂参与电力市场投标报价的参考

随着可再生能源的快速发展和电力市场改革的推进，虚拟电厂将在未来扮演越来越重要的角色。虚拟电厂通过整合多种分散的分布式能源资源，利用先进的数字技术和智能控制系统实现对电力系统的灵活调度和管理，响应电力市场的能量与辅助服务需求。

本文提供的灵活性资源聚合参考模型与指标体系，可以协助虚拟电厂的运营商评估内部所管理

的分布式灵活性资源的功率可调节范围。虚拟电厂运营商可以结合电力市场的价格预测与内部灵活性资源的调节成本，形成参与能量市场和辅助服务市场的投标报价策略，实现虚拟电厂在电力市场的套利。

4 结论

本文构建了适应多种辅助服务需求的灵活性量化指标体系，建立了由等效发电机和等效储能设备所构成的灵活性资源聚合参考模型，并以等效发电机设备的功率、爬坡能力和等效储能设备的功率、储能能力作为量化指标，给出了基于高维多面体投影及边界收缩算法的相关参数求解方法。所述的聚合参考模型和指标体系具有直观的物理意义和良好的多重嵌套特性，并且适用于多种时间尺度。聚合参考模型可以在分布式资源集群的异步调度、综合能源系统的联合优化调度和虚拟电厂参与能量市场和辅助服务市场的投标报价等多个方面发挥作用，因此具有很好的推广应用前景。

参 考 文 献

[1] CHICCO G, RIAZ S, MAZZA A, 等. Flexibility From Distributed Multienergy Systems[J/OL]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1496-1517. DOI:10.1109/JPROC.2020.2986378.

[2] 邱玥, 陆帅, 陆海, 等. 综合能源系统灵活性：基本内涵、数学模型与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 16-43.

[3] DEGEFA M Z, SPERSTAD I B, SÆLE H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources[J/OL]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107022. DOI:10.1016/j.epsr.2021.107022.

[4] ULBIG A, ANDERSSON G. Analyzing operational flexibility of electric power systems[C/OL]//2014 Power Systems Computation Conference. 2014: 1-8. DOI:10.1109/PSCC.2014.7038383.

[5] WANG P, WU D, KALSI K. Flexibility Estimation and Control of Thermostatically Controlled Loads With Lock Time for Regulation Service[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3221-3230. DOI:10.1109/TSG.2020.2973186.

[6] HAO H, SANANDAJI B M, POOLLA K, 等. Aggregate Flexibility of Thermostatically Controlled Loads[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 189-198. DOI:10.1109/TPWRS.2014.2328865.

[7] ZHAO L, ZHANG W, HAO H, 等. A Geometric Approach to Aggregate Flexibility Modeling of Thermostatically Controlled Loads[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4721-4731. DOI:10.1109/TPWRS.2017.2674699.

[8] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Evaluation of Power System Flexibility[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 922-931. DOI:10.1109/TPWRS.2011.2177280.

[9] THATTE A A, XIE L. A Metric and Market Construct of Inter-Temporal Flexibility in Time-Coupled Economic Dispatch[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3437-3446. DOI:10.1109/TPWRS.2015.2495118.

[10] LU Z, LI H, QIAO Y. Probabilistic Flexibility Evaluation for Power System Planning Considering Its Association With Renewable Power Curtailment[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3285-3295. DOI:10.1109/TPWRS.2018.2810091.

[11] NOSAIR H, BOUFFARD F. Flexibility Envelopes for Power System Operational Planning[J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 800-809. DOI:10.1109/TSTE.2015.2410760.

[12] WEI W, LIU F, MEI S. Dispatchable Region of the Variable Wind Generation[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2755-2765. DOI:10.1109/TPWRS.2014.2365555.

[13] MÜLLER F L, SZABÓ J, SUNDSTRÖM O, 等. Aggregation and Disaggregation of Energetic Flexibility From Distributed Energy Resources[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1205-1214. DOI:10.1109/TSG.2017.2761439.

[14] 栗子豪, 李铁, 吴文传, 等. 基于 Minkowski Sum 的热泵负荷调度灵活性聚合方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(05): 14-23.

[15] YI Z, XU Y, GU W, 等. Aggregate Operation Model for Numerous Small-Capacity Distributed Energy Resources Considering Uncertainty[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4208-4224. DOI:10.1109/TSG.2021.3085885.

[16] TAN Z, ZHONG H, XIA Q, 等. Non-Iterative Multi-Area Coordinated Dispatch via Condensed System Representation[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1594-1604. DOI:10.1109/TPWRS.2020.3019828.

[17] ZHAO H, CHEN J, WANG B, 等. A Robust Aggregate Model for Multi-Energy Virtual Power Plant in Grid Dispatch[C/OL]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Beijing, China: IEEE, 2019: 1631-1636[2020-05-19]. DOI:10.1109/iSPEC48194.2019.8975334.

[18] WANG S, WU W, CHEN Q, 等. Stochastic Flexibility Evaluation for Virtual Power Plant by Aggregating Distributed Energy Resources[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022: 1-11. DOI:10.17775/CSEEJPES.2021.07410.

[19] LIN W, JIANG H, JIAN H, 等. High-dimension tie-line security regions for renewable accommodations[J/OL]. Energy, 2023, 270: 126887. DOI:10.1016/j.energy.2023.126887.

[20] CHEN X, DALL'ANESE E, ZHAO C, 等. Aggregate Power Flexibility in Unbalanced Distribution Systems[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 258-269. DOI:10.1109/TSG.2019.2920991.

[21] RIAZ S, MANCARELLA P. Modelling and Characterisation of Flexibility From Distributed Energy Resources[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 38-50. DOI:10.1109/TPWRS.2021.3096971.

[22] CHEN X, LI N. Leveraging Two-Stage Adaptive Robust Optimization

for Power Flexibility Aggregation[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3954-3965. DOI:10.1109/TSG.2021.3068341.

[23] CUI B, ZAMZAM A, BERNSTEIN A. Network-Cognizant Time-Coupled Aggregate Flexibility of Distribution Systems Under Uncertainties[J/OL]. IEEE Control Systems Letters, 2021, 5(5): 1723-1728. DOI:10.1109/LCSYS.2020.3045080.

[24] WEN Y, HU Z, YOU S, 等. Aggregate Feasible Region of DERs: Exact Formulation and Approximate Models[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4405-4423. DOI:10.1109/TSG.2022.3179998.

[25] 何永秀, 陈倩, 费云志, 等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[Z]//电网技术: 卷 42. 2018: 2915-2922.

[26] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[Z]//电工技术学报: 卷 38. 2023: 1662-1677.

[27] PJM. PJM Manual 11: Energy & Ancillary Services Market Operations[Z/OL]. (2023-05-31)[2023-07-02]. https://www.pjm.com/directory/manuals/m11/index.html#table-of-exhibits.html.

[28] 国家能源局华北监管局. 华北区域并网发电厂"两个细则"（2019 年修订版）[EB/OL]//华北能源监管局关于印发华北区域并网发电厂"两个细则"（2019 年修订版）的通知. (2019-09-30)[2023-07-05]. http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=000000006c2a4364016d7de32f4d01f5.

[29] PJM. PJM Manual 12: Balancing Operations[Z/OL]. (2023-03-22). https://www.pjm.com/-/media/documents/manuals/m12.ashx.

[30] NGO V, WU W. Linear Programming Contractor for Interval Distribution State Estimation Using RDM Arithmetic[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2114-2126. DOI:10.1109/TPWRS.2020.3033065.

[31] NGO V, WU W. Interval Distribution Power Flow With Relative-Distance-Measure Arithmetic[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3858-3867. DOI:10.1109/TSG.2021.3074018.

[32] WANG S, WU W, CHEN Q, 等. Stochastic flexibility evaluation for virtual power plant by aggregating distributed energy resources[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022: 1-11. DOI:10.17775/CSEEJPES.2021.07410.

[33] GUGGILAM S S, ZHAO C, DALL'ANESE E, 等. Optimizing DER Participation in Inertial and Primary-Frequency Response[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5194-5205. DOI:10.1109/TPWRS.2018.2798540.

[34] FENG C, CHEN Q, WANG Y, 等. Provision of Contingency Frequency Services for Virtual Power Plants With Aggregated Models[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2798-2811. DOI:10.1109/TSG.2022.3229273.

[35] A. A. JAHROMI, F. BOUFFARD. On the Loadability Sets of Power Systems—Part I: Characterization[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 137-145. DOI:10.1109/TPWRS.2016.2547945.

[36] TAN Z, ZHONG H, WANG J, 等. Enforcing Intra-Regional Constraints in Tie-Line Scheduling: A Projection-Based Framework[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4751-4761. DOI:10.1109/TPWRS.2019.2913876.

[37] X. CHEN, N. LI. Leveraging Two-Stage Adaptive Robust Optimization for Power Flexibility Aggregation[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3954-3965. DOI:10.1109/TSG.2021.3068341.

[38] WANG S, WU W. Aggregate Flexibility of Virtual Power Plants with Temporal Coupling Constraints[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051. DOI:10.1109/TSG.2021.3106646.

[39] DAI W, YU J, YANG Z, 等. A Static Equivalent Model of Natural Gas Network for Electricity–Gas Co-Optimization[J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1473-1482. DOI:10.1109/TSTE.2019.2927837.

[40] CHEN B, WU W, GUO Q, 等. An efficient optimal energy flow model for integrated energy systems based on energy circuit modeling in the frequency domain[J/OL]. Applied Energy, 2022, 326: 119923. DOI:10.1016/j.apenergy.2022.119923.

[41] WANG S, WU W, LIN C, 等. A Dynamic Equivalent Energy Storage Model of Natural Gas Networks for Joint Optimal Dispatch of Electricity-Gas Systems[M/OL]. arXiv, 2023[2023-07-25]. http://arxiv.org/abs/2307.12709. DOI:10.48550/arXiv.2307.12709.

作者简介：王思远(1997—)，男，博士研究生，主要研究方向：综合能源系统灵活性资源聚合与等值，数据驱动的能源系统参数辨识。E-mail：wangsy0424@foxmail.com

作者简介：吴文传(1973—)，男，通信作者，博士，教授，博士生导师，主要研究方向：能量管理系统、主动式配电网运行与控制、机器学习在能源系统中的应用等。E-mail：wuwench@tsinghua.edu.cn

（本文编辑　xxx）

Reference Model and Quantitative Metrics of Aggregated Flexible Energy Resources

WANG Siyuan [1,2], WU Wenchuan [1,2]

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Power Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The high penetration of the renewable energy generation brings significant volatility and uncertainty for the power system operation. To address this issue, it is necessary to involve a significant amount of flexible

resources for grid dispatch and ancillary services. The numerous, widely distributed, and diverse characteristics of these flexibility resources make cluster-based management difficult, requiring a quantitative evaluation of their power flexibility range. This article proposes a quantification metrics system for aggregating flexible resources based on their application requirements in grid dispatch and the power market. By classifying the energy resources in the cluster into generator-type and storage-type, they are respectively aggregated into equivalent generator and equivalent storage devices as the reference model. The parameters of these two equivalent devices serve as the quantification metrics, possessing intuitive physical meanings, robust nested characteristics, and applicability across multiple time scales. These metrics can be widely applied in many scenarios, such as the asynchronous dispatch of distributed resource clusters, the coordinated optimization dispatch of integrated energy systems, and bidding of virtual power plants participating in the power market.

Key words: flexible energy resources; aggregated reference model; quantitative metrics of flexibility; high-dimensional polytope projection